

Г.М. Креков, В.Д. Прилепских

### ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНИЗОТРОПНОГО ЛИНЕЙНОГО ТРЕХЗЕРКАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА

Рассматривается влияние линейного поляризатора на избирательные свойства резонатора. Обнаружена связь между амплитудно-частотными и поляризационными характеристиками и найдено объяснение эффекта увеличения-уменьшения остроты селекции при использовании частичного поляризатора.

В последние годы большое внимание уделяется лазерным резонаторам с анизотропными элементами [1–5], как наиболее перспективным для селекции продольных мод и управления поляризацией излучения. С введением в резонатор фазовых элементов появляется дополнительная степень свободы в управлении его амплитудно-частотными характеристиками, что позволяет надеяться на улучшение селективных свойств. Проведенные в этой области исследования носят преимущественно теоретический характер, т. к. в многозеркальных линейных анизотропных резонаторах не были получены существенно лучшие результаты по сравнению с изотропными, широко используемыми в настоящее время. Исключением оказался трехзеркальный резонатор с двумя фазовыми элементами и поляризатором [3, 4], схема которого приведена на рис. 1.

Резонатор состоит из установленных на одной оптической оси трех зеркал 1, 2 и 3 с коэффициентами отражения  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , двух фазовых элементов 4 и 5 и линейного поляризатора 6. В качестве фазовых элементов используются линейные фазовые пластины (ЛФП), которые расположены по обе стороны от среднего зеркала 2 резонатора. Линейный поляризатор находится в большей части резонатора, где предполагается размещение активного элемента лазера.

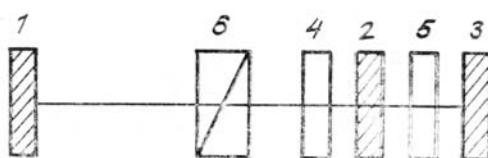


Рис. 1. Схема резонатора: 1, 2 и 3 — зеркала, 4 и 5 — фазовые элементы, 6 — линейный поляризатор

Анализ влияния отдельных параметров исследуемой системы на ее избирательные свойства [3, 4] показал, что наилучшие характеристики реализуются, когда ЛФП 4 четвертьволновая и ее оптическая ось ориентирована под углом  $\pi/4$  к оси максимального пропускания линейного поляризатора, изотропные потери в элементах минимальны, а  $R_3 \rightarrow 1$ . Наибольшая область свободной дисперсии достигается при двух значениях разности фаз в пластинке  $5: 2\varphi_1 = \pi/2$  — четвертьволновая ЛФП и  $2\varphi_2 = \arcsin[(1-R) \cdot (1+R)^{-1}]$ , — назовем его вариантом с «тонкой» фазовой пластиной. При этом наилучшие избирательные свойства имеют место, когда главные оси ЛФП 5 совпадают с осями ЛФП 4 [4, 5]. Напротив, если угол  $\beta$  между главными осями пластинок составляет  $\pi/4$ , то избирательные свойства системы наихудшие, что особенно заметно при частичном поляризаторе [5], когда минимальное пропускание последнего существенно отлично от нуля. В работе [5] на частном примере показано также, что при неидеальном поляризаторе может достигаться не только большее ослабление мод, близких к выделяемой, но и далеко отстоящих от нее по частоте.

В настоящей статье рассмотрено влияние линейного поляризатора на избирательные свойства трехзеркального резонатора и показана связь между его амплитудно-частотными и поляризационными характеристиками.

В приближении плоских волн характеристики исследуемой системы могут быть получены с помощью матричного метода Джонса [6] путем решения уравнения

$$A \cdot \hat{M} \cdot E = \Lambda_{1,2} \cdot E.$$

Здесь  $\hat{M}$  — обобщенная матрица резонатора;  $E$  — электрический вектор световой волны, распространяющейся в нем;  $\Lambda_{1,2}$  — собственные значения матрицы  $\hat{M}$ ;  $A$  — множитель, равный

$\sqrt{R_1} \cdot \exp(2ivL)$ , где  $v = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda$  — длина волны,  $L$  — длина резонатора. О поляризационных свойствах системы можно судить по параметру  $k$ , равному отношению компонент электрического вектора  $\mathbf{E}$ , а наибольшая из функций  $|\lambda|^2$  соответствует амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) резонатора.

Если ограничиться случаем наилучших значений параметров ЛФП 4,  $R_3 = 1$  и отсутствием потерь в элементах и положить  $R_1 = 1$  (уменьшение этого параметра так же, как и максимального пропускания поляризатора, ведет лишь к пропорциональному изменению  $|\lambda|^2$ ), то квадрат модуля собственного значения и параметр  $k$  для двух экстремальных углов  $\beta$  будут равны:

1) при  $\beta = 0$  (главные оси ЛФП 4 и 5 совпадают)

$$|\Lambda_{1,2}|^2 = 0,25(1+F)^{-1} \cdot |1+P \pm (1-P)\sqrt{1-SF}|^2; \quad (1)$$

$$\kappa_{1,2} = -\frac{i}{\sqrt{SF}} \cdot (1 \pm \sqrt{1-SF}), \quad (2)$$

где  $S = 4P \cdot (1-P)^{-2}$ ;  $P$  — отношение минимального пропускания поляризатора  $b$  к максимальному;  $F = F_1 \cdot \cos^2 2vt$ , если ЛФП 5 четвертьволновая, и  $F = F_2^2 \cdot \sin^4 vl$  для случая с «тонкой» ЛФП 5,  $F_1 = 4R(1-R)^{-2}$ ,  $F_2 = 4\sqrt{R} \cdot (1+R) \cdot (1-R)^{-2}$ ,  $l$  — средняя оптическая длина пассивного промежутка (между зеркалами 2 и 3).

2) при  $\beta = \pi/4$

$$|\Lambda_{1,2}|^2 = 0,25 \cdot (1+F)^{-1} \cdot |1-P \pm (1+P)\sqrt{1+HF}|^2; \quad (3)$$

$$\kappa_{1,2} = \frac{1}{\sqrt{HF}} (1 \pm \sqrt{1+HF}), \quad (4)$$

где  $H = 4P \cdot (1+P)^{-2}$ .

Проанализируем выражение (1). Если  $SF \leq 1$ , а это имеет место вблизи максимума АЧХ, знак модуля может быть заменен скобками. В случае же, когда  $SF > 1$ , имеем  $|\Lambda_{1,2}|^2 = P$ , т.е. в определенном интервале  $vl$  квадрат модуля собственного значения является величиной постоянной. Расчеты показали, что наибольшая глубина селекции, характеризующая ослабление далеко отстоящих мод от выделяемой и определяемая, как отношение максимального значения АЧХ к минимальному, достигается, когда равенство  $|\Lambda_1| = |\Lambda_2|$  выполняется лишь для двух значений  $vl$  на периоде (АЧХ). В случае четвертьволновой пластинки 5 это происходит при  $P = P_1 = (1-\sqrt{R})^2 \cdot (1+\sqrt{R})^{-2}$ . Когда ЛФП 5 «тонкая», наибольшая глубина селекции получается при

$$P = P_2 = (\sqrt{F_2^2 + 1} - F_2)^2.$$

Нетрудно показать, что при использовании линейного поляризатора большая глубина селекции достигается при

$$2\varphi_1 = \pi/2 \text{ в } (1+\sqrt{R})^4(1+R)^{-2} \text{ раз, а при } 2\varphi_2 = \arcsin[(1-R) \cdot (1+R)^{-1}] \text{ в } (\sqrt{F_2^2 + 1} - F_2)^{-2} \cdot (1+F_2^2)^{-1} \text{ раз.}$$

Если  $R \rightarrow 1$ , относительное увеличение ослабления далеко отстоящих мод в обоих случаях приближается к значению, равному 4, однако заметное абсолютное увеличение, что важно с точки зрения практического использования, наблюдается лишь при четвертьволновой ЛФП 5 и малых плотностях среднего зеркала резонатора ( $R \leq 0,35$ ). Так, самая большая разница в минимальных значениях  $|\lambda|^2$  (для частичного поляризатора и идеального) согласно расчетам имеет место при  $R = 0,061$  и составляет  $\sim 0,4185$ . С увеличением параметра  $P$  (при  $\beta = 0$  и фиксированном  $R$ ) от 0 до оптимального значения ( $P_1$  или  $P_2$ ) наблюдается рост глубины селекции. Дальнейшее увеличение  $P$  ведет к уменьшению ослабления далеко отстоящих мод от выделяемой. Если же  $\beta = \pi/4$ , любое увеличение  $P$  влечет за собой уменьшение глубины селекции, что следует из анализа уравнения (3).

Рассмотрим изменение остроты АЧХ (называемой еще остротой селекции [5, 7]). Если определять ее как коэффициент при квадратичном члене в разложении функции, описывающей АЧХ, по степеням  $vl$  вблизи максимума [7], что вполне справедливо для случая с четвертьволновой ЛФП 5, то можно показать, что при  $\beta = \pi/4$  острота селекции в резонаторе с частичным поляризатором уменьшается по сравнению со случаем идеального поляризатора в  $(1+P) \cdot (1-P)^{-1}$  раз, а при  $\beta = 0$  во столько же раз увеличивается. Реальное увеличение остроты (на некотором уровне  $\xi$ ), определяемой

как минимальное отношение области свободной дисперсии к полосе частот в этой области, где величина АЧХ превышает выбранный уровень, оказывается несколько меньшим. Это видно из рис. 2, где приведены полученные численными методами четыре кривые, иллюстрирующие изменение остроты селекции в зависимости от параметра  $P$  для двух наилучших значений сдвига фаз в ЛФП 5, при  $\beta = 0$  на уровнях 0,5 (кривые 3 и 4) и 0,75 (кривые 1 и 2). Увеличение остроты лишь для  $2\phi_1 = \pi/2$  на уровне 0,5 (кривая 3), соответствует предсказанному аналитически. Для такой же ЛФП на уровне 0,75 острота АЧХ увеличивается значительно меньше (в 4 раза, а не в 7, как ожидалось при изменении  $P$  от 0 до 0,75), что показывает кривая 1 на рис. 2. При использовании «тонкой» фазовой пластинки увеличение остроты селекции значительно меньше (в 1,7–2,3 раза, см. кривые 2 для  $\xi = 0,75$  и 4 для  $\xi = 0,5$ ). Необходимо отметить, что при малых значениях  $P$  большая острота АЧХ при одном и том же  $R$  достигается в случае с «тонкой» ЛФП 5, а при больших  $P$  — наоборот. Отсюда следует, что для лазеров с малым усилением активной среды предпочтительнее вариант с четвертьволновой пластинкой.

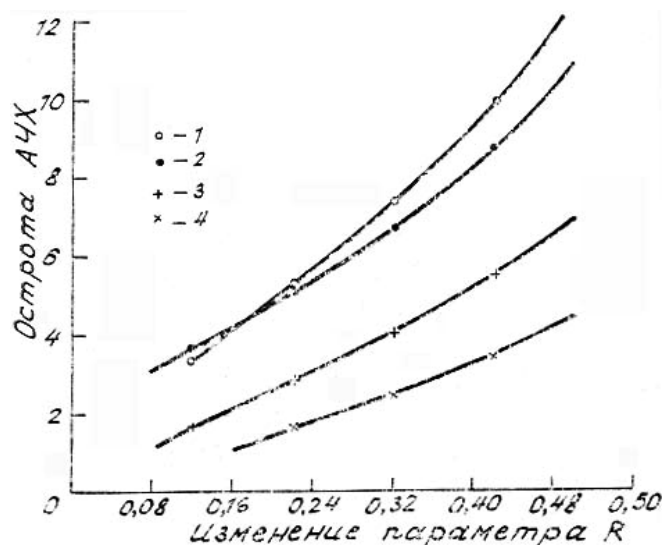


Рис. 2. Острота АЧХ исследуемой оптической системы в зависимости от свойств поляризатора: 1 и 3 для четвертьволновой ЛФП, 2 и 4 — для «тонкой» ЛФП

Увеличение остроты селекции, как показали численные расчеты, наблюдается практически вплоть до достижения параметром  $P$  значения уровня  $\xi$ , поэтому при создании лазера на основе исследуемого резонатора  $P$  целесообразно выбирать несколько (на 0,01–0,05) меньшим, чем  $(1 - G + B)$ , где  $G$  — усиление активной среды за проход, а  $B$  — суммарные неселективные потери, включающие половину потерь, обусловленных пропусканьем крайних зеркал (1 и 3).

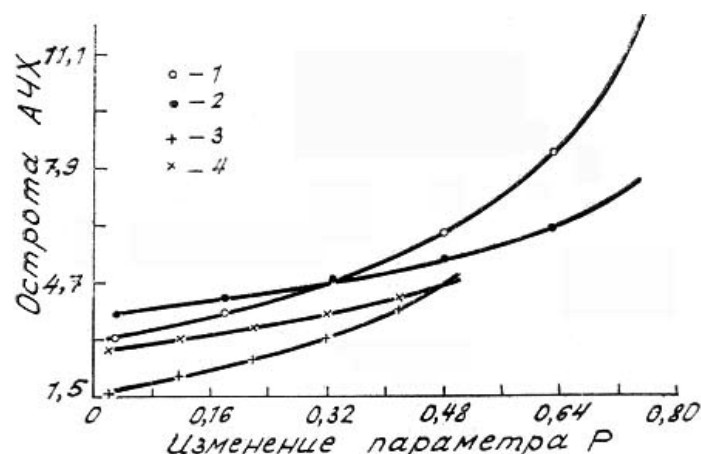


Рис. 3. Сравнение избирательных свойств анизотропного резонатора и резонаторов с интерферометрами Фабри—Перо и Фокса—Смита

Сравнение избирательных свойств широко используемых резонаторов с селекторами в виде интерферометра Фабри—Перо (ИФП), Фокса—Смита (ИФС) и исследуемой системы показало, что последняя обеспечивает как большую глубину, так и большую остроту селекции. На рис. 3 приведе-

ны зависимости остроты АЧХ от коэффициента отражения соответствующего зеркала (зеркал) для четырех резонаторов: 1 — для исследуемого резонатора с четвертьволновой пластинкой в пассивном промежутке, 2 — для случая с «тонкой» ЛФП, 3 — для резонатора с ИФП, 4 — для резонатора с ИФС. Из расчетов следует, что трехзеркальный линейный резонатор с четвертьволновыми пластинками и частичным поляризатором имеет в 1,7–2 раза большую остроту АЧХ, чем резонатор с ИФП, и в 2,8–4 раза большую, чем резонатор с ИФС.

Рассмотрим некоторые поляризационные характеристики исследуемой оптической системы. На резонансных частотах, как показали расчеты, при любых реальных значениях параметров  $\beta$ ,  $\varphi$  и  $P$  поляризация линейная. При уходе от положения резонанса и  $P \neq 0$  поляризация изменяется, причем в зависимости от значения  $\beta$  эти изменения различны. При  $\beta \neq \pi/4$  световые волны остаются линейно поляризованными, что следует непосредственно из анализа выражения (4) для  $k$  и подтверждается численными расчетами (см. сплошная кривая 3 на рис. 4). В этом случае изменяется направление электрического вектора, т.е. азимут.

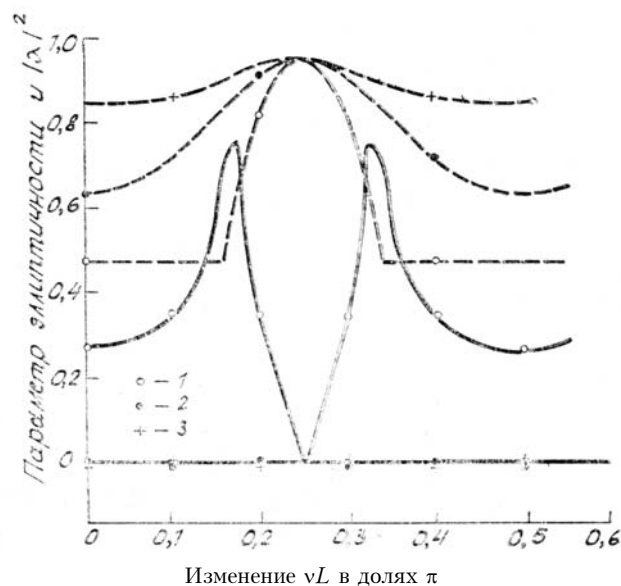


Рис. 4. Параметры эллиптичности и значения АЧХ для различных значений  $\beta$  и  $P$ : 1— $\beta = 0$ ,  $P > 0$ ; 2— $P = 0$ ; 3— $\beta = \pi/4$ ,  $P > 0$

Если  $\beta \neq 0$ , при уходе от положения резонанса преимущественно изменяется параметр эллиптичности. Он достигает своего максимума, как видно из поведения сплошной кривой 1 на рис. 4, при значениях  $\nu l$ , близких к таким, где  $|\Lambda_1|$  перестает быть равным  $|\Lambda_2|$  (т.е. в точках, где  $SF \neq 1$ ). Из рисунка также видно, что в этом случае острота и глубина селекции выше (см. штриховую кривую 1), чем для  $P = 0$  (соответственно кривая 2), и значительно выше, чем для варианта с  $\beta = \pi/4$  (штриховая кривая 3) при  $P > 0$ . Таким образом, просматривается связь между собственной поляризацией резонатора и его избирательными свойствами. Следует отметить, что при частичном поляризаторе в рассматриваемом резонаторе (путем изменения параметра  $\beta$  и  $\nu l$ ) возможно управление в некоторой степени поляризацией излучения. Говорить об управлении в широких пределах нельзя, поскольку заметное изменение поляризации наблюдается лишь при значительном уходе от положения резонанса, но при этом и резко уменьшается значение  $|\Lambda|^2$ , что делает резонатор практически непригодным.

Если представить световые колебания в резонаторе как суперпозицию двух ортогонально поляризованных волн, электрические векторы которых совпадают с выделенными направлениями линейного поляризатора, то эффекты увеличения — уменьшения избирательных свойств можно объяснить следующим образом. Селективный отражатель, включающий зеркала 2 и 3 и анизотропные элементы, на нерезонансных частотах изменяет поляризацию излучения, преобразуя энергию одной волны в энергию другой (ортогонально поляризованной) и наоборот. При  $\beta = 0$  поляризация эллиптическая, а сдвиг фаз между ортогональными компонентами электрического вектора стремится к  $\pi/2$ . Волна, амплитуда которой меньше, падая на селективный отражатель, частично преобразуется в ортогонально поляризованную, причем сдвинутую по фазе на  $\pi$  относительно волны с большей амплитудой. При этом последняя ослабляется, и наблюдается увеличение как глубины, так и остроты селекции. Если  $\beta = \pi/4$ , поляризация линейная, а сдвиг фаз между ортогональными компонентами стремится к  $\pi$ . Волна с меньшей амплитудой частично преобразуется при отражении в ортогонально поляризованную, сдвинутую по фазе на  $2\pi$  относительно волны с большей амплитудой. При этом последняя уси-

ливается, а глубина и острота селекции соответственно уменьшаются. При идеальном поляризаторе ( $P = 0$ ) ни тот, ни другой эффекты не проявляются, поскольку амплитуда одной из волн равна нулю. Проведенные исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

1. При определенном выборе параметров резонатора и частичном поляризаторе как острота, так и глубина селекции больше, чем в случае с идеальным линейным поляризатором.
2. Избирательные свойства исследуемой системы в 1,7–4 раза выше, чем у резонаторов с селекторами в виде интерферометров Фабри–Перо или Фокса–Смита.
3. Существует связь между избирательными свойствами анизотропного трехзеркального резонатора и его поляризационными характеристиками.
4. В исследуемом резонаторе возможно управление остротой и глубиной селекции (в том числе оперативно путем изменения параметра  $\beta$ ), а также в некоторой степени поляризацией излучения.

1. Новиков М.А., Тертышник А.Д. //Изв. вузов Радиофизика. 1976. Т. 19. № 3. С. 364.
2. Бельтюгов В.Н., Троицкий Ю.В. //Квантовая электроника, 1980. Т. 7. № 11. С. 2299.
3. Захаров М.И., Прилепских В.Д. Характеристики анизотропного трехзеркального лазерного резонатора. Новосибирск. 1984. Рукопись деп. в ВИНТИ, № 7036.
4. Захаров М.И., Прилепских В.Д. Частотная селекция в лазерах при помощи анизотропного отражающего интерферометра. Новосибирск, 1984. Рукопись деп. в ВИНТИ, № 6435.
5. Белкин А.М., Захаров М.И. //Автоматика. 1987. № 3. С. 119.
6. Молчанов В.Я., Скроцкий Г.В. //Квантовая электроника. 1971. № 4. С. 3.
7. Троицкий Ю. В. Одночастотная генерация в газовых лазерах. Новосибирск: Наука, 1975. 159 с.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР, Томск  
Новосибирский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии

Поступила в редакцию  
5 декабря 1988 г.

**G.M. Krekov, V.D. Prilepskich. The Selective Properties and Polarization Characteristics of the Anisotropic Linear three — mirror Resonator.**

The influence of a linear polarizer upon selective properties of rezonator is considered. The relation between the amplitude-frequency characteristics of the optical system and its polarization characteristics is shown.